

大深部岩体における水圧破碎貯留層形成プロセスの数値シミュレーションに関する研究

著者	板岡 幹世
号	2926
発行年	2002
URL	http://hdl.handle.net/10097/8199

氏名	いた おか みき よ
授与学位	板岡 幹 世
学位授与年月日	博士 (工学)
学位授与の根拠法規	平成 15 年 3 月 24 日
研究科, 専攻の名称	学位規則第 4 条第 1 項
学位論文題目	東北大学大学院工学研究科 (博士課程) 地球工学専攻
指導教官	大深部岩体における水圧破碎貯留層形成プロセスの 数値シミュレーションに関する研究
論文審査委員	主査 東北大学教授 橋田 俊之
	東北大学教授 松木 浩二
	東北大学教授 林 一夫
	助教授 佐藤 一志
	(宮城工業高等専門学校)

地熱エネルギーは地球環境への負荷が小さなエネルギー源の一つである。近年、地熱エネルギー抽出を進展させるものとして、超臨界地熱システムが提案された。この超臨界地熱システムで開発対象となるのは、水の超臨界点を越える温度・圧力条件下にある大深部岩体である。ここで大深部岩体における地熱貯留層形成挙動は貯留層の設計の観点から重要な問題である。大深部岩体において水圧破碎により誘起されるき裂は、主き裂周辺に微視き裂分散領域を形成する可能性を有し、かつ岩石に固有なせん断モードを含む混合モード破壊で進展する可能性がある。

以上より、本論文では大深部岩体における水圧破碎地熱貯留層形成プロセス、特に微視き裂分散領域およびき裂進展モードに関する地殻応力の影響を解明することを目的とする。

本論文は全 6 章で構成される。第 1 章は序論であり、第 6 章は結論である。

第 2 章では大深部岩体における微視き裂分散領域形成の影響を検討するための破壊モデルを新たに開発した。

微視き裂分散領域の形成はフィールドスケールだけでなく、実験室スケールにおいても観察される現象である。水圧破碎により主き裂周辺に微視き裂分散領域が形成された場合には、微視き裂分散領域も熱交換面として作用することが考えられるため、その形成挙動は地熱エネルギー抽出システムの性能に直結する重要な問題である。したがってここでは、き裂先端のブリッジングゾーンに加えて微視き裂分散領域の影響も考慮した破壊モデルを新たに開発する。

破壊モデルは二次元有限要素法およびき裂要素を用いて構成される。

微視き裂分散領域は準ひずみ硬化挙動としてモデル化される。応力ひずみ曲線を多直線近似することによりその挙動を模擬した。微視き裂分散領域は要素重心の最大主応力が準ひずみ硬化挙動で与えられる限界値に達したときに初生および進展する。ひずみ硬化条件は二次元ランキン降伏関数で与え、関連流動則および等方的な硬化則を仮定した。

微視き裂分散領域が局所化することによる巨視的なき裂進展挙動は最大主応力条件に基づいてモデル化した。き裂は要素重心の最大主応力が初期引張り強さに達したときに、最大主応力に垂直な方向に発生する。き裂要素を用いてブリッジングを伴うき裂を表現した。

ブリッジングゾーンの影響は結合カモデルを用いてモデル化した。岩石材料におけるブリッジングゾ

ーンの形成は結合モデルを用いることでモデル化できることが知られている。結合モデルではき裂面に作用する結合力がき裂変位の増加に従って減少する。

き裂要素はき裂やすべり線などの変位の局所化を取り扱うために開発された。き裂要素ではき裂は連続体要素中の不連続変位としてモデル化される。き裂要素の主な利点は、任意の位置および方向のき裂を要素中に導入可能なことである。この利点により、要素分割の変更なしに任意のき裂の取扱いが可能である。

飯館花崗岩に関するコンパクトテンション(CT)試験を模擬した数値解析により本破壊モデルの妥当性を確認した。また、東北大理石に関する封圧下 CT 試験を模擬した数値解析を行い、封圧条件下において微視き裂分散領域の形成が抑制されることを示唆する結果を得た。

第3章では第2章で開発した破壊モデルを用い、微視き裂分散領域とき裂先端のブリッジングゾーンを考慮した水圧破碎挙動に関する数値シミュレーションを行った。

大規模水圧破碎の数値解析を行った。計算領域は四節点四角形要素を用いて分割した。要素寸法は100mm 四方である。岩体の物性は東北大理石で測定された値を用いた。初期き裂を計算領域中心部に配置し、封圧条件を0, 0.5, 1.5, 3.0MPa で与えて解析を行った。破碎圧として一様なき裂内圧を作用させることで水圧破碎を模擬した。

封圧0および3.0MPa での数値解析結果より、水圧破碎における微視き裂分散領域の形成は3.0MPa において抑制されるものと考えられる。また、封圧0MPa において微視き裂分散領域で消費されたエネルギーは3.0MPa の場合に比べて大きいことがわかった。一方、両封圧条件とも、微視き裂分散領域で消費されたエネルギーはき裂先端のブリッジングゾーンで消費されたエネルギーに比べて十分に小さいことがわかった。

微視き裂分散領域の幅は封圧の増加に伴って減少し、下限値に至る。東北大理石の場合、その幅が下限値に至る限界封圧は、東北大理石の引張り強さにほぼ等しい1.5MPa であった。

これらの数値解析結果は、大深部岩体における水圧破碎において微視き裂分散領域の形成が抑制されること、ならびに微視き裂分散領域の影響がき裂先端のブリッジングゾーンの影響に比べて十分に小さいことを示唆するものであると考えられる。

この結果に基づき、以降の検討では微視き裂分散領域の影響は無視し、き裂先端のブリッジングゾーンの影響のみを扱うこととする。

第4章では大深部岩体における水圧破碎き裂進展挙動を検討するため、混合モード破壊の取扱いが可能な数値シミュレーションプログラムを新たに開発した。

ここで開発した数値シミュレーションプログラムはき裂内流体圧分布解析と岩体の変形・破壊解析から構成される。

混合モード破壊で生じたき裂は任意の進展経路をとる可能性がある。さらに、岩石中のき裂進展に関しては破壊プロセスゾーンの影響を考慮する必要がある。これら任意方向のき裂と破壊プロセスゾーンの影響をともに扱うため、変形・破壊解析では有限要素法とき裂要素を用いることとした。破壊プロセスゾーンの影響は結合モデルによってモデル化し、その結合モデルは破壊関数を用いてき裂構成則としてき裂要素に組み込むことで実現している。

き裂の初生と破壊プロセスの進展は破壊関数によって与えられる。すなわち、破壊関数の初期形状がき裂の初生を規定する。またき裂初生後の岩石材料は破壊プロセスの進展に伴って、破壊プロセスゾー

ンの影響により軟化挙動を示すことが知られている。破壊関数は破壊プロセスの進展に伴って結合力モデルに従い残留摩擦応力を示す最終形状へと順次変化する。ここで、き裂面の応力状態はその時々破壊関数を満たすように変化し、それによって軟化挙動を実現している。

き裂面にせん断すべりが生じた場合、き裂面の凹凸に起因してき裂に開口変位が発生する。この挙動はせん断膨張と呼ばれる。本破壊モデルにはこのせん断膨張挙動をモデル化して組み込んでいる。

破壊モデルは二次元有限要素法にき裂要素を用いることで構成される。き裂はき裂先端近傍の破壊判定点の応力状態が初期破壊関数に達したときに進展する。このとき破壊条件を満たした要素は、その後き裂要素となる。進展き裂の方向は破壊関数と破壊判定点の応力状態から決定される。各要素について発生するき裂は一つのみとし、新たに発生したき裂はき裂先端に接続するように配置することとした。

岩体の物性は飯館花崗岩に関する三軸圧縮試験および一軸引張り試験で得られた結果に基づいて与え、流体には水を想定した。

き裂内流体圧分布解析プログラムおよび破壊関数の初期形状の妥当性を確認した。また本破壊モデルによって得られる解析結果の要素寸法依存性が大きくないことを示した。封圧下三軸圧縮試験を模擬した数値解析を行い、数値解析で得られたき裂進展挙動が実験で観察される挙動に対して十分に妥当であることを示した。これらの結果は本破壊モデルを用いることにより、大深部岩体における水圧破碎き裂進展モードの検討が可能であることを示すものである。

第5章では、第4章で開発したプログラムを用い、破壊プロセスゾーンおよび混合モードき裂進展を考慮した水圧破碎挙動数値シミュレーションを行った。

小規模な計算領域を考え、四節点四角形要素を用いて分割した。要素寸法は14mm四方である。計算領域中心部に水平方向に対して45°の傾きをもった初期き裂を配置し、そこに破碎圧を作用させた。き裂進展後は進展き裂に沿った流体圧分布を解析した。

地殻応力場は岩体のかぶり圧によって与えられる応力場を仮定した。鉛直方向地殻応力をかぶり圧とし、底面の変位を固定、側面の水平方向変位を拘束した場合、水平方向地殻応力はポアソン比の関数として与えられる。地殻応力比の影響を検討するため、ポアソン比は0.45, 0.30, 0.25, 0.15で与えた。ここでポアソン比の値が大きいときに地殻応力比は大きくなる。

ポアソン比0.25、深度1kmの場合、き裂は最大圧縮応力方向（鉛直方向）に進展し、また下方よりも上方に長く進展している。深度6kmでは、進展き裂は鉛直方向に対し若干傾いているものの、上方に進展したき裂が下方に進展したものに比べて長い点は1kmの場合と同様である。深度10kmでは、き裂進展方向は6kmの場合よりも一層鉛直方向に対して傾いている。これらのき裂進展挙動の差異は、深度の変化に伴った地殻応力の違いによって破壊モードが変化したためであると考えられる。

本論文ではき裂先端の変形モードを表すものとして破壊モード比を定義した。破壊モード比はき裂先端の変形状態から求められ、純粋な開口モードの場合に90°、純粋なせん断モードの場合に0°にそれぞれ対応する。深度1から4kmの場合には、平均破壊モード比はほぼ90°であった。また深度4km以降では深度の増加に伴って減少し、10kmで33°に達した。この結果は、深度4kmまでは破壊モードが開口モードであるのに対し、4km以降では深度の増加に伴ってせん断モード成分が大きくなることを示唆するものであると考えられる。

き裂進展時におけるき裂先端前方の応力状態を調べた結果、深度1から4kmまでの場合、破壊は引張り強さのみで特徴付けられ、せん断モードの寄与はないことがわかった。したがって、き裂は圧縮応力

が小さくなる上方に進展する傾向があるものと考えられる。6km の場合には破壊モードは混合モードであることがわかった。また 8km 以降では、破壊時の応力状態は圧縮状態にあり、したがって破壊モードはせん断モードであることがわかった。せん断応力は地殻応力の増加に伴って増加するため、せん断モード破壊ではき裂が下方に進展する可能性があると考えられる。

深度 6km, ポアソン比 0.30 の場合、破壊モードはほぼ開口モードであった。一方、ポアソン比 0.15 の場合には、破壊モードはほぼせん断モードであった。これは地殻応力比が減少するとせん断応力が増加するためであると考えられる。この結果は、破壊モードが地殻応力の大きさだけでなく、地殻応力比によっても変化することを示唆するものである。

数値解析結果より、深度と地殻応力比からなる平面は破壊モードについて開口モード領域、せん断モード領域、および混合モード領域の三領域に分割できる。フィールドでの地殻応力比に関する報告によると、深度 3km において地殻応力比はほぼ 0.5 から 1.0 の範囲にあるようである。ここで、大深部岩体の開発として現在の地熱貯留層をより深度の大きい（より高温な）岩体に形成することを考えると、開発対象となる深度は 5km 程度と考えられる。したがって、数値解析結果および地殻応力比に関するフィールドデータに基づいて検討した場合、大深部岩体における水圧破碎地熱貯留層は開口モードによって形成されるものと考えられる。

なお、物性の温度依存性を考慮した検討を行い、上記の結果が高温条件においても同様であることを示唆する結果を得た。

論文審査結果の要旨

既存地熱貯留層の直下に広がる深部岩体からの抽熱が、地殻エネルギー抽出量の増大に大きく貢献できるものと期待されている。近年の調査では、このクラスの岩体は地熱資源としての高いポテンシャルを有するものの、抽熱媒体の通路となる天然き裂が乏しいことが示されており、人工的に抽熱システムを作成することが要求される。従来から、人工抽熱システムの作成には水圧破碎法が多用され、水圧破碎き裂進展に関して数多くの研究が行われているものの、岩石特有のせん断型破壊の形成を考慮した検討がされておらず、大深部での水圧破碎挙動については未解明の課題であった。

本論文は、水圧破碎法により人工抽熱システムを形成することを想定し、岩石特有のせん断型破壊条件を組み込んだ破壊クライテリオンに基づく水圧破碎解析コードを構成し、大深部岩体における水圧破碎き裂進展挙動に関する検討を行い、それらの結果をまとめたもので全編6章よりなる。

第1章は序論であり、本研究の背景を述べている。

第2章では、巨視き裂周辺の分散型微視き裂の形成を考慮した破壊解析モデルを提案している。引張き裂進展を対象として、ランキンの破壊規準を用いた非線形変形モデルに基づき、引張軟化則を考慮した破壊解析モデルを構成している。岩石の破壊靱性試験結果を模擬した数値解析を実施し、荷重-変位関係および破壊エネルギーの観点から、作成した破壊解析モデルの妥当性を検証している。

第3章では、第2章で作成した破壊解析モデルを用いた水圧破碎き裂進展の数値解析により、分散型微視き裂形成に及ぼす地殻応力（封圧）の影響に関する検討を行っている。分散型微視き裂の形成挙動は、き裂端の特異応力場のみならずき裂周辺での広領域における応力場に支配されることを示している。さらに、大深部岩体中では水圧破碎き裂進展に伴う分散型微視き裂形成に消費されるエネルギーは無視でき、引張軟化過程によるエネルギー吸収が主たるものであることを明らかにした。これらの結果は、岩石破壊力学に関する重要な知見を提供している。

第4章では、引張破壊に加えてせん断破壊を考慮した水圧破碎数値解析コードを作成している。き裂要素を用い、引張軟化曲線ならびにすべり軟化曲線に従う結合力モデルが組み込まれており、混合モード下での水圧破碎き裂進展挙動の解析を可能にしている。また、封圧下での3軸圧縮試験で得られているせん断破壊挙動との比較により、数値解析コードの妥当性を検証している。

第5章では、第4章で構成した数値解析コードを用いて、水圧破碎き裂進展モードに及ぼす地殻応力の影響を検討している。種々の地殻応力分布に対する系統的な数値解析を実施することにより、深度が大きくなるに従いき裂進展モードが引張破壊からせん断破壊に遷移することを示し、地殻応力比に基づくき裂進展モード線図を提案している。この線図に基づき、現在の開発対象である深部岩体においては、水圧破碎き裂進展は引張破壊により生じる可能性の高いことが示されている。提案されたき裂進展モード線図は、水圧破碎による貯留層形成に重量な知見を提供するものであり、学術的ならびに実用的な意義を有している。

第6章は結論である。

以上要するに本論文は、岩石特有の破壊条件を考慮して未開拓の深部岩体における水圧破碎挙動を明らかにしたものであり、地球工学、特に貯留層工学の発展に寄与するところが少なくない。

よって、本論文は博士（工学）の学位論文として合格と認める。